

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES MINES ET GEOLOGIE

Intitulé du cours :

BONIFICATION DES GRANULATS

Niveau : 3^{ÈME} ANNEE MINES ET GÉOLOGIE

Auteure : Mme S. ATTIL Née KHERBACHE

Maître de Conférences A

Volume horaire semestriel : 22h30

Avant-propos

Ce cours est destiné aux étudiants de 3^{ème} année licence (Semestre 5) des deux (02) options : "Exploitation des mines" et "Valorisation des ressources minérales". Il présente les notions fondamentales des propriétés physiques et les caractéristiques des granulats ainsi que les différentes méthodes de caractérisation et d'analyse aux étudiants non-initiés avec cette discipline. Le document constitue une synthèse conduisant le lecteur à saisir les éléments essentiels et les notions de base de la matière. Le polycopié possède le nécessaire afin de comprendre la nature des granulats, les différentes techniques d'échantillonnage, la granulométrie et son influence sur les propriétés physique d'un granulat ainsi que la classification des granulats. Dans ce contexte, il représente un support couvrant les chapitres du programme officiel. La présentation de ce cours permet aux non-initiés d'appréhender progressivement les propriétés, les classifications et sources des granulats.

Il n'est certainement pas nécessaire de préciser l'importance des granulats employés essentiellement pour la confection des bétons utilisés pour la construction. Ils sont utilisés pour la réalisation d'ouvrages de Génie Civil, de travaux routiers et de différentes structures. Il s'agit principalement du matériau de base utilisé dans le secteur du bâtiment.

Ce cours est réparti en cinq chapitres. Le premier chapitre est consacré à la nature et paramètres des granulats, suivit par le chapitre II qui porte sur les techniques d'échantillonnage. Le chapitre III présente la granulométrie. Le chapitre IV traite les durabilités et les matières délétères, et enfin le chapitre V fait objet de l'influence de la granulométrie sur les propriétés physiques d'un granulat. Les références bibliographiques sont présentées à la fin de ce cours.

Table des matières

Avant-propos	2
Chapitre I : Nature et paramètres des granulats	4
I.1 Définition	4
I.2 Source de granulats	4
I.3 Les gravières et les sablières	5
I.4 Forme des granulats	5
I.5 Nature des granulats	5
I.6 Caractéristiques géométriques des granulats	6
Chapitre II : Techniques d'échantillonnage	7
II.1 Introduction	7
II.2 Prélèvement d'échantillons	7
Chapitre III : Granulométrie	12
III.1 Définition	12
III.2 L'analyse granulométrique par tamisage	12
III.3 L'analyse granulométrique par séimentométrie	13
III.4 La courbe granulométrique	14
III.5 Sol grenus et sol fin	17
III.6 Classification des sols	18
Chapitre IV : Durabilités et les matières délétères	25
IV.1 Définition	25
IV.2 Essais de résistance à l'usure et au choc	25
IV.3 Justification des essais à l'usure	31
Chapitre V : Influence de la granulométrie sur les propriétés physiques d'un granulat	34
V.1 Introduction	34
V.2 Assemblage de sphères dans l'espace	34
V.3 La loi de Darcy	37
V.4 La relation entre le coefficient de perméabilité et k et la granulométrie	37
V.5 La perméabilité de quelques matériaux granulaires	38
V.6 Critères d'utilisation des granulats	39
V.7 Calibre d'un granulat	39
Références	42

Chapitre I : Nature et paramètres des granulats

I.1 Définition

Le granulat est appelé aussi agrégat, est un ensemble de matériaux inertes (**inactif, latent**) (sable, gravier,...etc) d'origine minérale, de dimensions comprises entre 0 à 80 mm, entrant dans la composition des mortiers et des bétons.).

I.2 Source de granulats :

Les granulats sont classés en deux (02) grandes catégories :

- **Les granulats naturels** : qui proviennent des sablières, des gravières ou des carrières.
- **Les granulats artificiels** : fabriqués à partir de résidus miniers ou à partir des structures désaffectées de béton ou d'enrobés bitumineux concassés.

Il existe trois (03) sources des granulats.

I.2.1 Les carrières :

Les granulats sont principalement extraits dans des carrières terrestres, qui se regroupent en deux (02) grandes catégories :

- Les carrières de roches meubles exploitent les gisements de sables et graviers déposés le plus souvent dans l'ancien lit d'une rivière. (**Sont des dépôts alluvionnaires présents dans les lits de rivière. Elles peuvent être récupérées pour faire des granulats**)
- Les carrières de roches massives exploitants des roches dures (éruptives métamorphiques ou calcaires). (**Couches plus ou moins épaisses : calcaire**).

I.2.2 Le recyclage :

Les granulats issus du recyclage valorisant des sous-produits industriels ou issus de la démolition de bâtiments ou de voiries (broyats de bétons, briques,etc).

I.2.3 L'extraction marine :

Ces gisements sont exploités par dragage en mer, entre 10 à 50 m de profondeur : granulats marins.

I.3 Les gravières et les sablières :

I.3.1 Les gravières :

Une gravière est une mine de gravier à ciel ouvert, c'est-à-dire une carrière produisant des granulats.

I.3.2 Les sablières :

Une sablière est constituée d'un ensemble de grains minéraux qui sont classés selon leur nature, leur forme et leurs caractéristiques qui varient en fonction des gisements et de techniques de production : carrière de sable.

I.4 Forme des granulats :

On distingue deux (02) grandes catégories de forme de granulats.

I.4.1 Granulats roulés :

Issus des roches meubles alluvionnaires (**alluvions au milieu des cours d'eau : déposés par les eaux**), ces granulats sont arrondis par usure dans les cours d'eau.

I.4.2 Granulats concassés :

Proviennent de roches massives en se brisant sous l'effet du concassage, ces graviers ont des arêtes vives et parois anguleuses.

I.5 Nature de granulats :

Un granulat peut être naturel, artificiel ou recyclés, tels que :

I.5.1 Le granulat naturel : est le granulat d'origine minéral n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique. Ces granulats sont issus de gisements alluvionnaires ou de carrières. Les granulats de carrières sont obtenus par un concassage permettant de diminuer la taille des éléments.

I.5.2 Le granulat artificiel : est le granulat d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres. Ce sont principalement des granulats transformés, comme le schiste expansé, l'argile expansée, mica expansé, granulats de laitier de haut fourneau qui correspondent aux déchets obtenus lors de la fonte des métaux.

I.5.3 Le granulat recyclé : est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction, tels que le béton et la brique concassés issus de la démolition de bâtiments ou de voiries.

I.6 Caractéristiques géométriques des granulats : les caractéristiques géométriques sont :

1.6.1 La granulométrie : est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la distribution des tailles des éléments composant la collection.

1.6.2 La forme des gravillons : La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques, qui sont :

- La longueur **L**,
- L'épaisseur **E**,
- La grosseur **G**.

Elle est caractérisée par la *Mesure du coefficient d'aplatissement*.

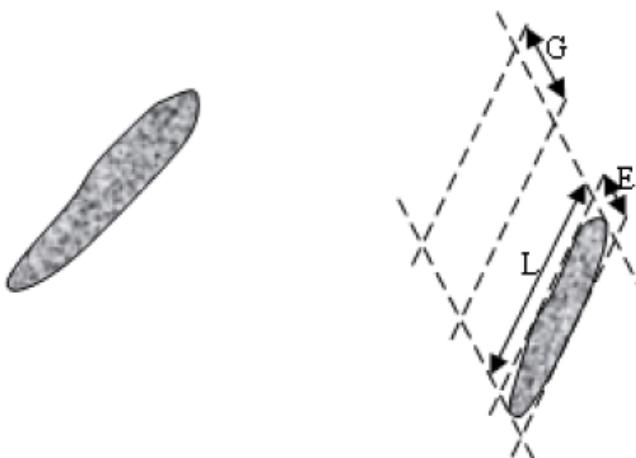


Figure I.1 Grandeurs géométriques d'un granulat

I.6.3 La granularité : Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide des tamis.

Chapitre II : Techniques d'échantillonnage

II.1 Introduction

Les essais effectués en laboratoire nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci doivent permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel y'a un prélèvement. Par conséquent, il faut que l'échantillon utilisé en laboratoire soit homogène et représentatif de l'ensemble.

II.2 Prélèvement d'échantillon :

En général le prélèvement d'échantillon se fait en deux (02) temps :

II.2.1 Prélèvement sur le tas

Le prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine, d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai. Le matériau n'étant pas homogène, le nombre de prélèvement doit aussi être grand que possible.



Figure II.1 Prélèvement d'échantillon de granulat sur le tas

II.2.2 Au laboratoire

Prélèvement par partage de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

➤ **Quartage :**

Cette opération de quartage consiste à séparer l'échantillon en quatre (04) parties. L'échantillon étalé est partagé en quatre (04) quarts sensiblement égaux. On élimine deux (02) fractions opposées et on réunit les deux (02) autres fractions. Si la quantité est encore trop importante, le quartage se poursuit selon le même processus jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

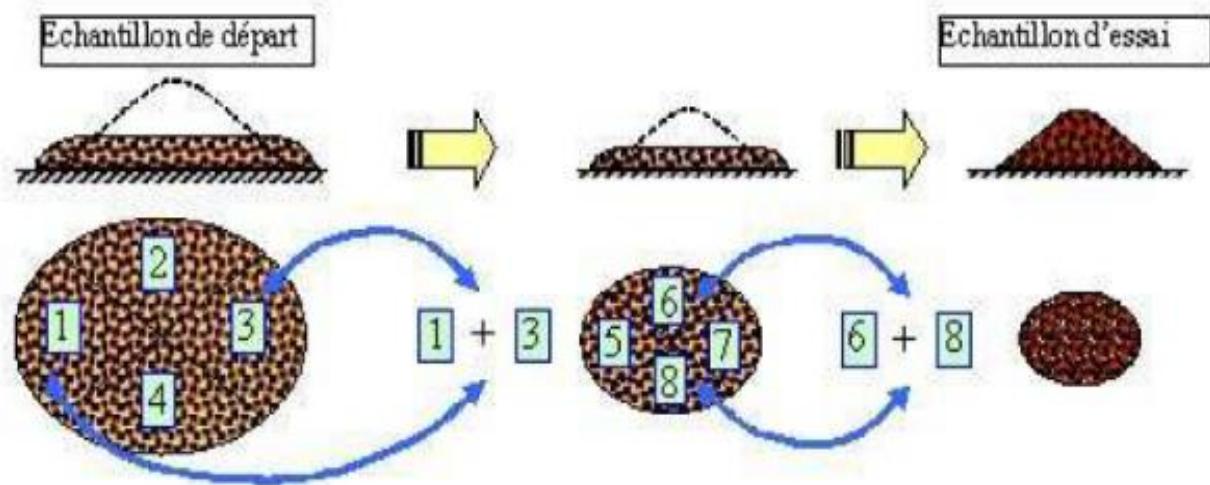


Figure II.2 Opération de quartage

➤ **Echantillonneur diviseur :**

Cet appareil de laboratoire, permet de diviser facilement en deux (02) parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée.

La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir l'échantillon nécessaire, après trois ou quatre opérations identiques.

Le procédé peut être résumé par la figure II.4. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse $3m$.



Figure II.3 Echantillonneur diviseur

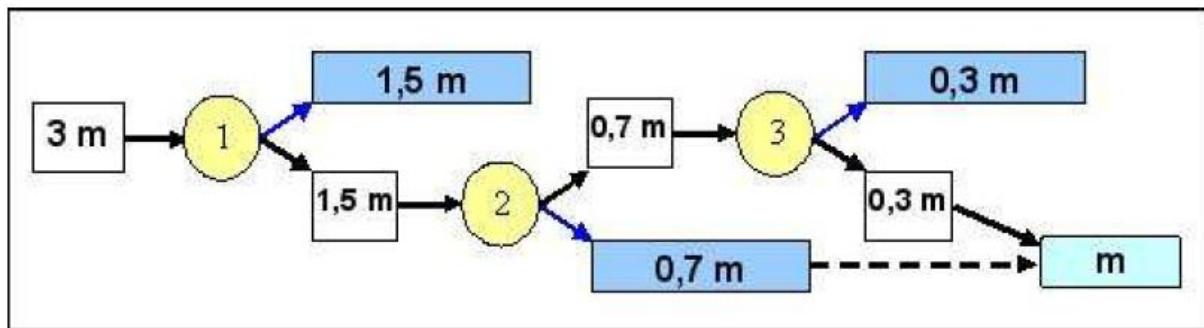


Figure II.4 Opération de répartition des matériaux en utilisant un échantillonneur.

II.2.3 Echantillonnage d'un matériau fin traversant le tamis de 5mm

Une méthode d'échantillonnage de sol pour analyse environnementale doit permettre de prélever un échantillon représentatif qui n'a subi qu'un minimum d'altérations découlant de son prélèvement.

L'échantillon doit être représentatif d'un emplacement précis et avoir un volume suffisant pour les besoins d'analyse. On recommande que la taille de l'équipement de prélèvement tienne également compte du diamètre des plus grosses particules à prélever.

Les méthodes d'échantillonnage peuvent également être divisées en trois (03) catégories :

- Echantillonnage de faible profondeur ;
- Echantillonnage dans un puits d'exploration ou une tranchée ;
- Echantillonnage à partir d'un forage.

Plusieurs types d'échantillonneurs sont utilisés en fonction de la méthode d'échantillonnage et de la granulométrie des sols échantillonnés.

Le tableau II.1 ci-dessous montre les principaux types d'échantillonneurs de sols fins :

Tableau II.1 : Principaux types d'échantillonneurs de sols

Matériel	Application générale	Avantages et inconvénients
Pelle et truelle	Sol de faible profondeur (0 - 1m) ou dans une tranche	Facile à utiliser, très facilement disponible, prélevement d'un échantillon remanié.
Tarière manuelle	Sol de faible profondeur (0 - 1m)	Facile à utiliser, prélevement d'échantillons remaniés, peu utilisable dans les sols compacts ou rocheux.
Tube d'échantillonnage	Sol de faible profondeur (0 - 0,5m) ou dans une tranchée	Facile à utiliser, peu coûteux, faible remaniement du sol (souhaitable pour des composés volatils), volume restreint de sol, difficile à utiliser dans les sols compacts ou rocheux.
Carottier fendu	Généralement utilisé avec un équipement de forage (0m- roc)	Peu de remaniement de l'échantillon, permet l'utilisation de manchons pour aider à maintenir l'intégrité de l'échantillon, durable, peut être utilisé dans des sols compacts, permet l'échantillonnage en continu.
Tube à paroi mince (Shelby)	Généralement utilisé avec un équipement de forage Sols argileux et silteux (0 m- roc)	Prélèvement d'échantillons non remaniés, peut être utilisé directement pour le transport au laboratoire, permet l'échantillonnage en continu, pas utilisable dans les sols rocheux.
Tube carottier de tarières creuses	Utilisé avec une foreuse à tarières creuses Sols argileux et silteux (0 m – roc)	Prélèvements d'échantillons non remaniés, facilite l'échantillonnage en continu des sols silteux et argileux, pas utilisable dans les sols rocheux.
Tube carottier pour foreuses rotatives	Sol et roc Utilisé avec une foreuse rotative uniquement	Permet l'échantillonnage de formations de sols contenant des blocs, facilite l'échantillonnage en continu, les fluides de forage peuvent altérer l'échantillon, carottiers à triple parois peuvent minimiser ce problème.

II.2.4 Echantillonnage sur bande transporteuse

II.2.4.1 Utilisation

Prélèvement de granulats, poudres, granulés, plaquettes forestières, à la jetée de transporteur. Prévu pour être sous les jetées pouvant aller jusqu'à 3 mètres de largeur.

Par son principe ce système garanti et assure un prélèvement représentatif.

II.2.4.2 Principe

Une auge mobile transite à une vitesse déterminée sous toute la largeur de jetée du produit et évacue l'échantillon capté :

- Soit en continu dans une trémie de recentrage de prélèvement.
- Soit en fin de course lorsque l'auge est capable de recevoir la totalité de l'échantillon avant d'être vidangé.

Chaque prélèvement est proportionnel :

- 1- Au débit,
- 2- À l'ouverture de l'auge
- 3- À sa vitesse de passage sous le flux.

II.2.4.3 Fonctionnement :

Un coffret de commande permet d'effectuer un cycle de prélèvement (qui peut comporter un ou plusieurs passages sous le flux). Un équipement peut permettre de programmer des prélèvements à intervalles réguliers ou variables et de les compter.

Ce matériel permet de prélever des échantillons représentatifs.

II.2.4.4 Matériel :

Tous les éléments sont réalisés en matériaux adaptés au produit à prélever, acier ou inox. La conception est particulièrement robuste. Les dimensions et la configuration du système dépendent de l'implantation de l'installation.



Figure II.5 Echantilleur pour bandes transporteuse.

Chapitre III : Granulométrie

III.1 Définition :

Les grains d'un matériau n'ont pas tous la même dimension, c'est-à-dire le squelette solide d'un sol est formé de particules de dimensions très variées. Un essai d'identification important consiste à étudier la granulométrie du sol, à savoir à déterminer la répartition des grains suivant leur dimension.

L'objectif de l'analyse granulométrique c'est de déterminer la grosseur et les pourcentages respectifs de différentes familles de grains constituant l'échantillon. Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des granulats (Fig.III.4), qui sont :

- **L'analyse granulométrique par tamisage** : pour les particules dont le diamètre moyen est supérieur à 80 µm ;
- **L'analyse granulométrique par séimentométrie** : pour les particules dont le diamètre moyen est inférieur ou égal à 80µm.

Remarque :

Il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains, et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

III.2 L'analyse granulométrique par tamisage :

Lorsque les particules ont une dimension supérieure à 80 µm, on procède à un simple tamisage. On utilise une série de tamis emboités les uns dans les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. On appelle **Tamisât** le poids de matériau passant à travers un tamis donné, et **Refus** le poids de matériau retenu pour ce même tamis.

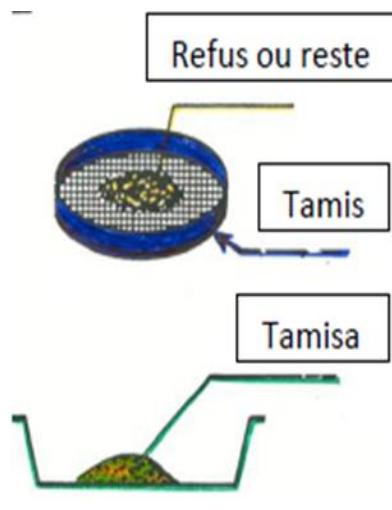


Figure III.1 Tamisât et refus

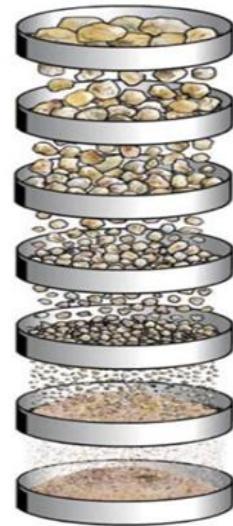


Figure III.2 Colonne de tamis

III.3 L'analyse granulométrique par séimentométrie :

L'analyse granulométrique par séimentométrie s'adresse à des échantillons de sol contenant que des éléments de diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$, c'est à dire ce qui est désigné sous l'appellation de sols fins. Elle complète l'analyse granulométrique par tamisage. Ce procédé basé sur la loi de stokes, cette loi donne la vitesse limite d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux (épais). Cette vitesse est fonction du diamètre de la particule, les particules les plus grosses tombant le plus rapidement.

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18 \eta} \cdot D^2$$

V : La vitesse limite de la chute de la particule [m/s],

γ_s : Poids volumique des grains solides [kN/m³],

γ_w : Poids volumique de l'eau [10kN/m³],

D : Le diamètre de la particule sphérique tombant dans l'eau [m],

η : La viscosité dynamique du liquide (l'eau) [Pa.s].

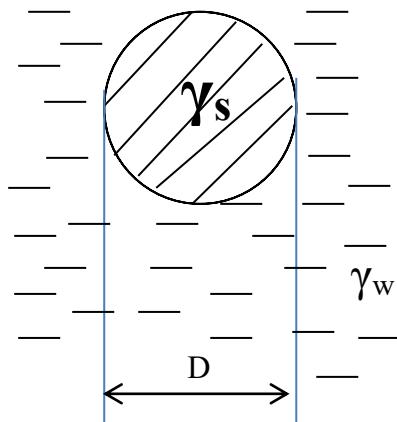


Figure III.3 Sédimentométrie.

III.4 La courbe granulométrique :

A partir des résultats de l'essai de tamisage et de l'essai de sédimentométrie, on peut tracer la courbe granulométrique du sol étudié, qui est la courbe des tamisâts cumulés en pourcentages (échelle arithmétique) en fonction des dimensions des tamis (échelle logarithmique). Ces coordonnées donnent pour chaque diamètre dy le poids y des particules de cette taille ou de taille inférieure (échelle semi-logarithmique).

Cette courbe contribue à l'identification de matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés. Elle est notamment utilisée pour la classification des sols grenus qui nécessite le calcul de deux (02) coefficients de forme. Ces coefficients sont donc immédiatement calculés à partir de la courbe granulométrique :

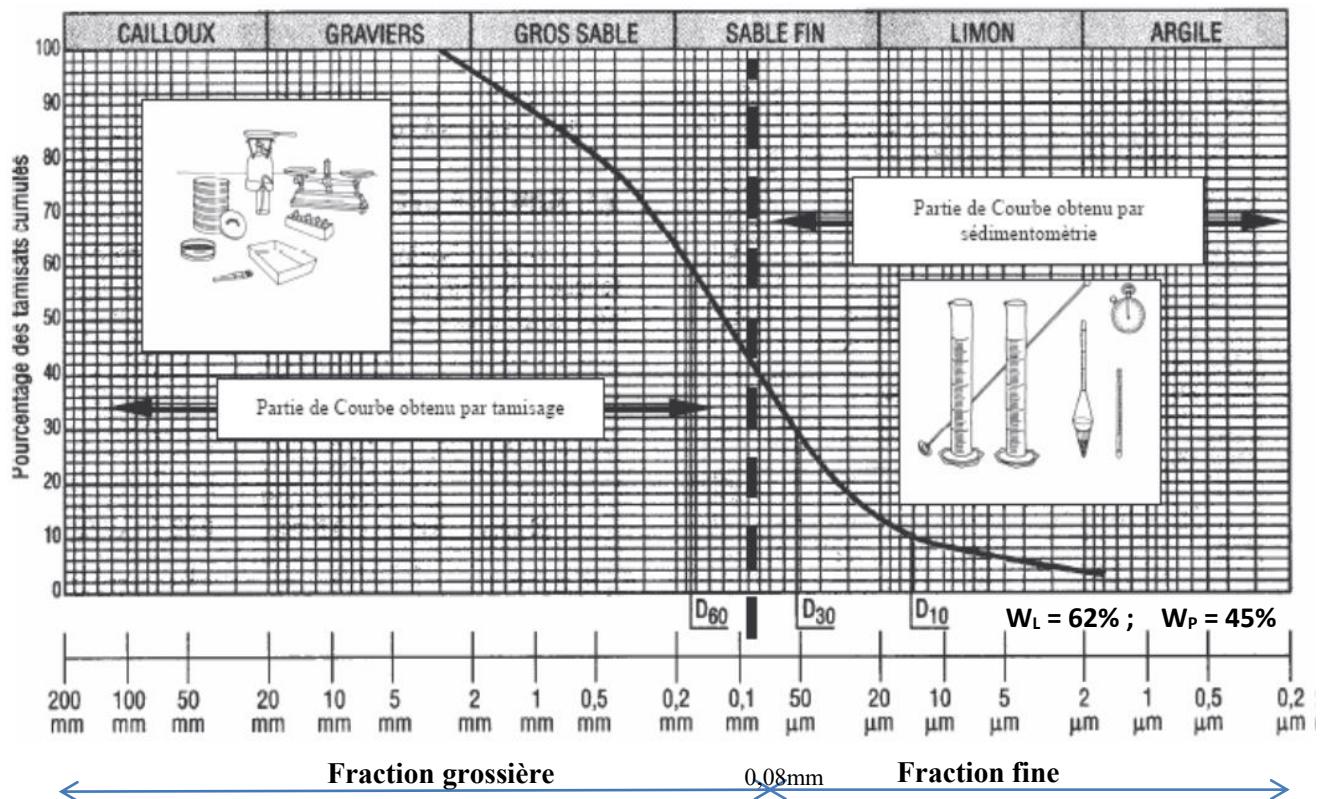


Figure III.4 : Courbe granulométrique

a- Le coefficient d'uniformité (ou coefficient de Hazen) : Cu

Il permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique, il est égal au rapport entre les diamètres correspondant respectivement aux tamisâts de 60% et de 10% :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D60 : représente l'ouverture du tamis à travers lequel passe 60% du poids des grains.
D10 : représente l'ouverture du tamis à travers lequel passe 10% du poids des grains.

- Si $Cu \geq 2$: la granulométrie est dite étalée (développée),
- Si $Cu < 2$: la granulométrie est dite serrée (uniforme).

b- Le coefficient de courbure : Cc

Il permet de décrire la forme plus ou moins régulière de la courbe :

$$Cc = \frac{(D30)^2}{D60 \cdot D10}$$

D30 : représente l'ouverture du tamis à travers lequel passe 30% du poids des grains.

Un sol est bien gradué si Cc est compris entre 1 et 3.

Quand ($1 > Cc > 3$) la granulométrie est dite discontinue.

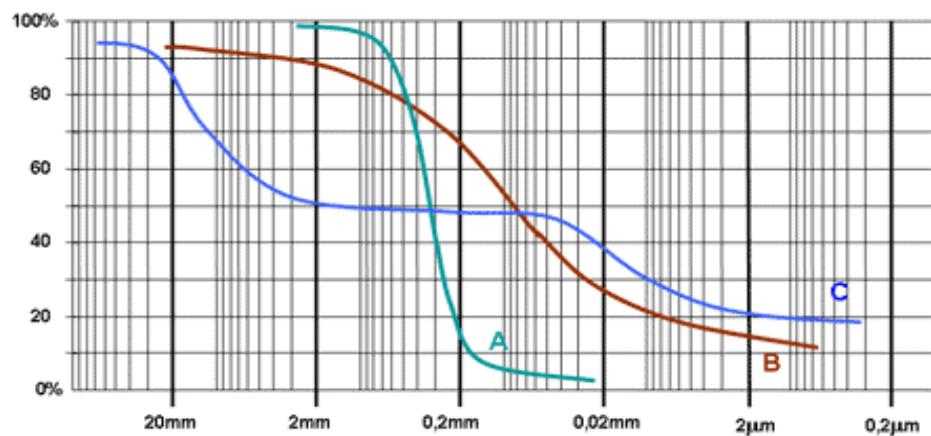


Figure III.5 : Exemple de courbes granulométriques

Application 01 :

Déterminer les coefficients de forme de la courbe granulométrique donnée par la figure III.4

Solution :

- Le coefficient d'uniformité :

$$Cu = \frac{D60}{D10} = \frac{0,17}{0,014} = 12,14 > 2$$

Cu = 12,14 > 2 ⇒ granulométrie étalée.

- Le coefficient de courbure :

$$Cc = \frac{(D30)^2}{D60 \cdot D10} = \frac{(0,052)^2}{0,17 \cdot 0,014} = 1,14$$

Cc = 1,14 ∈ [1 - 3] ⇒ bien gradué.

Donc le sol étudié est un **sol bien gradué de granulométrie étalée**.

III.5 Sol grenu et sol fin

Bien que les sols que l'on rencontre dans la nature aient des dimensions de grains très variable, la distinction entre sols grenus et sols fins sera utile à la fois pour la description des sols et pour l'étude de leur comportement.

On rencontre souvent des sols dont la courbe granulométrique recouvre les deux (02) domaines précédents (sol grenu et sol fin).

Les sols réels sont des mélanges de matériaux grenus (pulvérulents) et fins (cohérents).

La granulométrie permet une première division des sols en deux grandes classes :

- Les sols grenus (les matériaux pulvérulents) —————— $D_{moy} > 0.08 \text{ mm}$
- Les sols fins (les matériaux cohérents) —————— $D_{moy} < 0.08 \text{ mm}$.

II.5.1 Le comportement des sols grenus :

Le comportement des sols grenus dépend des paramètres qui caractérisent le squelette.

Les propriétés des sols grenus dépendent avant tout de la dimension des grains solides et de leur état de compacité (état lâche ou serré du squelette).

II.5.2 Le comportement des sols fins :

Bien que la dimension des grains ait une influence, le comportement d'un sol fin est en fonction de sa composition minéralogique, de sa teneur en eau et de sa structure ; c'est-à-dire de la manière dont les particules sont disposées et orientées les unes par rapport aux autres.

Dans les sols fins, l'eau joue un rôle important. Selon la valeur de la teneur en eau, les propriétés mécaniques d'un sol fin évoluent depuis celles d'un solide (w faible) jusqu'à celle d'un liquide (w élevée). Entre ces deux états, pour des teneurs en eau moyennes, le sol présente des propriétés plastiques, c'est-à-dire ; il est capable de se déformer rapidement, et changer de volume sans présenter de déformation.

a- La teneur en eau : (w)

Elle est déterminée comme étant le rapport du poids de l'eau au poids des grains solides d'un certain volume de grains, elle s'exprime en pourcentage :

$$\begin{aligned} W &= \frac{P_e}{P_g} \cdot 100 \\ &= \frac{P_h - P_g}{P_g} \cdot 100 \\ &= \frac{M_h - M_g}{M_g} \cdot 100 \end{aligned}$$

Application 02 :

Un échantillon de granulat a une masse de 1200gr, après passage à l'étuve sa masse n'est que de 800gr, Calculer la teneur en eau de ce granulat.

Solution :

$$\text{On a : } W = \frac{M_h - M_g}{M_g} \cdot 100$$

$$W = \frac{1200 - 800}{800} \cdot 100 = 50\%$$

Le passage d'un état à un autre est progressif, On utilise depuis 1905 les limites d'Atterberg. Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau conventionnelles, qui fixent un état d'un sol. On les mesure sur la fraction des terres passant à travers le tamis 400 µm (0.4mm). Ces limites, qui s'expriment en pourcentages, sont les suivantes :

- a- **Limite de liquidité (W_L)** : Elle marque le passage de l'état liquide à l'état plastique.
- b- **Limite de plasticité (W_P)** : Elle marque le passage de l'état plastique à l'état solide.
- c- **Indice de plasticité (I_P)** : Il marque l'étendu du domaine plastique (il délimite le domaine plastique), Il permet donc de déterminer une zone dans laquelle on considérera qu'un sol est à l'état plastique. il est la différence entre W_L et W_P .

$$I_P = W_L - W_P$$

III.6 Classification des sols

A partir des résultats fournis par la granulométrie et les limites d'Atterberg, il est possible de classer les sols en différentes catégories. Cette classification permet de fournir une définition rapide d'un terrain, mais ne donne qu'une idée globale de son comportement mécanique.

III.6.1 Sols à granulométrie uniforme :

Lorsque les dimensions des grains sont peu différentes, on peut adopter la classification suivante, reposant sur le diamètre moyen :

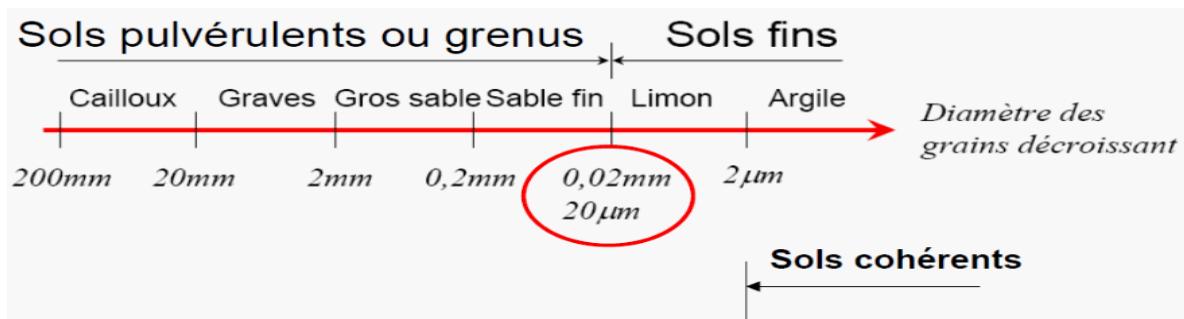


Figure III.6 : Classification d'un sol à granulométrie uniforme.

➤ **Module de finesse :**

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse MF. Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5mm

Application 03 :

- Compléter le tableau ci-dessous ;
- Calculer le module de finesse de ce sable et commenter le résultat.

Masse échantillon = 2850gr			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés (gr)	Refus cumulés (%)	Tamisâts cumulés (%)
5	0	?	?
2,5	109	?	?
1,25	846	?	?
0,63	1463	?	?
0,315	1893	?	?
0,16	2135	?	?
0,08	2299	?	?

Solution :

Masse échantillon = 2850gr			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés (gr)	Refus cumulés (%)	Tamisâts cumulés (%)
5	0	0	100
2,5	109	04	96
1,25	846	30	70
0,63	1463	51	49
0,315	1893	67	33
0,16	2135	75	25
0,08	2299	81	19

$$MF = (75+67+51+30+4) / 100 = \mathbf{2,27}$$

$2,2 < MF = 2,27 < 2,8 \Rightarrow$ On est en présence d'un sable préférentiel (un sable moyen)

III.6.2 Sols à granulométrie non uniforme :

Suivant la classification LCPC, on distingue deux (02) grands types de sols :

- Les sols grenus dont 50% d'éléments en poids sont supérieurs à 80 µm,
- Les sols fins dont 50% d'éléments en poids sont inférieurs à 80 µm.

a- Les sols grenus :

La classification des sols se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg, elle est précisée dans le tableau ci-après (tableau III.1) :

Tableau III.1 Classification des sols grenu L.C.P.C

Définitions		Symboles	Conditions	Désignations géotechniques
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	Gb	$c_U = \frac{D_{50}}{D_{10}} > 4$ et $c_C = \frac{(D_{50})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		GL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A ¹⁷	grave limoneuse
		GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A ¹⁷	grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	Sb	$c_U = \frac{D_{50}}{D_{10}} > 6$ et $c_C = \frac{(D_{50})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		SL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A ¹⁷	sable limoneux
		SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A ¹⁷	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % ⇒ on utilise un double symbole

b- Les sols fins :

La classification des sols fins utilise des critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. On définit quatre (04) grandes catégories principales :

- Les limons très plastiques (L_t)
- Les limons peu plastiques (L_p)
- Les argiles très plastiques (A_t)
- Les argiles peu plastiques (A_p)

Selon la position d'un point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité (W_L) et pour ordonnée l'indice de plasticité I_p dans un diagramme appelé diagramme de plasticité (voir fig III.7) :

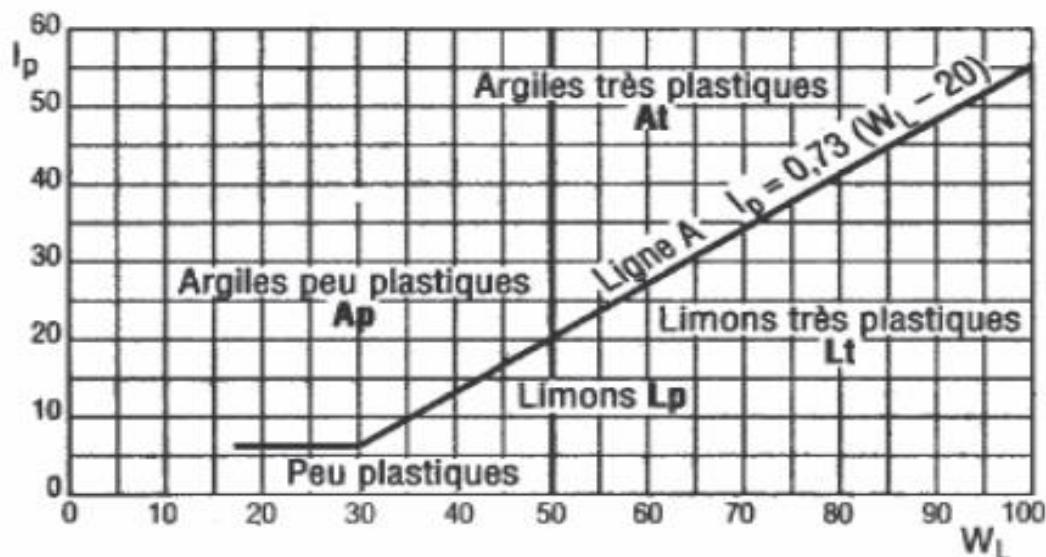


Figure III.7: Abaque de plasticité de Casagrande

Application 04 :

Donner, d'après la classification LCPC la dénomination du sol dont la courbe granulométrique et les limites d'Atterberg sont données par la figure III.4 ci-dessus.

Solution :

On a 40% des éléments ont un diamètre < 0.08 mm (80µm) \Rightarrow Sol grenu

Donc, 60% des éléments ont un diamètre > 0.08 mm (80µm)

96% d'éléments ont un diamètre < 2mm

Donc, 04% d'éléments ont un diamètre > 2mm

On a 40% d'éléments ont un diamètre < 0,08mm \Rightarrow plus de 12%

Les limites d'Atterberg données par la figure sont : $W_L = 62\%$; $W_P = 45\%$

$\Rightarrow I_P = 17\%$; les limites d'Atterberg se trouvent au-dessous de la ligne A (voir figure III.7), donc il s'agit d'un **sable limoneux**.

Application 05 :

La composition d'un béton précise que, pour un volume total de 1 m³, le mélange contient 750 kg de sable présentant un taux d'absorption de 0,6 %, ainsi que 935 kg de gravier dont l'absorption est de 0,4 %. À la suite d'une période de pluie, ces deux granulats, stockés en tas à l'air libre, présentent des teneurs en eau de 5,2 % pour le sable et de 2 % pour le gravier.

- 1- Déterminer les masses à peser de chaque granulat afin d'obtenir les quantités requises dans la formulation du béton, puis calculer la quantité d'eau apportée par ces granulats humides ;

- 2- Après une période d'ensoleillement, les teneurs en eau des granulats deviennent respectivement 0,2% pour le gravier et 1,6% pour le sable.
Déterminer les nouvelles masses de granulats à peser afin de fabriquer 1 m³ de ce béton.

Solution :

1- A partir de la formule :
$$\frac{M_h}{1+\frac{w_{tot}}{100}} = \frac{M_{sat}}{1+\frac{abs}{100}}$$

M_h : Masse humide

M_{sat} : Masse à saturation

abs : Absorption du granulat

w_{tot} : La teneur en eau totale

- Masse de sable humide : $750 \times \frac{1,052}{1,006} = 784 \text{ kg.}$
- Masse de gravier humide : $935 \times \frac{1,020}{1,004} = 950 \text{ kg}$
- Eau des granulats qui s'incorporent au béton : $(784 - 750) + (950 - 935) = 49 \text{ kg}$

2- Dans la 2^{ème} situation, on obtient :

- Masse de sable humide : $750 \times \frac{1,016}{1,006} = 757 \text{ kg}$
- Masse de gravier humide : $935 \times \frac{1,002}{1,004} = 933 \text{ kg}$
- Eau apportée par les granulats et incorporée au béton :

$$(757 - 750) - (935 - 933) = 5 \text{ kg.}$$

Chapitre IV : Durabilité et matières délétères

IV.1 Définition :

La durabilité d'un matériau se définit par sa capacité à durer dans le temps. Dans le contexte des matériaux de construction, elle fait référence à la capacité de ce matériau à maintenir sa qualité et sa fonctionnalité sur une longue période, tout en minimisant son impact environnemental.

Les substances délétères généralement redoutées dans le domaine du bâtiment sont l'amiante, le benzène, les émissions de fours à coke, le plomb, la silice, le chlorure,...etc.

IV.2 Essais de résistance à l'usure et au choc

IV.2.1 Résistance à l'usure : Essai Micro-Deval NF P 18-572

➤ But de l'essai :

L'essai Micro-Deval en présence d'Eau (MDE) permet de déterminer la résistance à l'usure par frottement d'un échantillon de granulat. L'échantillon est soumis à un cycle d'usure, en présence d'eau, par contact avec des billes d'acier à l'intérieur d'un cylindre en rotation. Le coefficient Micro-Deval obtenu est le pourcentage de l'échantillon initial passant au tamis de 1.6 mm après usure. Plus le pourcentage d'usure est bas, plus l'échantillon est résistant à l'usure.

➤ Principe de l'essai

Si **M** est la masse du matériau soumis à l'essai (diamètre compris entre 4 et 25mm), on mesure après abrasion et usure dans un cylindre en rotation (1200 tours en 2 heures), la masse **m** des éléments inférieurs à 1.6mm produits. La résistance à l'usure s'exprime par le

$$\text{coefficient Micro-Deval MDE: } \text{MDE} = \frac{m}{M} \times 100$$

Tableau IV.1 Classes granulaires et billes équivalentes

Classe granulaire (mm)	Masse de l'échantillon (gr)	Charge abrasive (gr)
10 – 14	500 ± 2	5000
6.3 – 10	500 ± 2	4000
4 – 6.3	500 ± 2	2000

➤ Expression des résultats

Le coefficient micro-Deval en présence d'eau est par définition :

$$MDE = \frac{M - m'}{M} 100 = \frac{m}{M} 100$$

M : est la masse sèche de l'échantillon pour essai qui est égale à 500g.

m' : est la masse sèche du matériau après l'essai de refus sur 1.6mm.

m : est la masse sèche de la fraction du matériau au passant après l'essai au tamis de 1.6mm.

Donc, on peut écrire : $MDE = \frac{500 - m'}{500} 100$



Figure IV.1: Appareil Micro Deval



Figure IV.2: Billes sphériques en acier

Le tableau ci-après (tableau IV.2) donne la classification des granulats en fonction de la valeur du coefficient Micro Deval en présence d'Eau selon la norme XP P 18-540 :

Tableau IV.2 Classes des granulats selon de l'essai MDE

Catégorie des granulats	Valeur MDE (%)
Très bon	10
Bon à moyen	10 à 20
Moyen à faible	20 à 35
Médiocre	> 35

IV.2.2 Résistance au choc : Essai Los Angeles NF P 18-573

➤ Définition

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement. Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la masse **m** d'éléments inférieurs à 1.6mm, produite par la fragmentation du matériau testé, et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations pendant 15 mn.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six (06) classes granulaires suivantes : 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm.

La masse de la charge des boulets varie suivant les classes granulaires, comme indiqué dans le tableau suivant :



Figure IV.3: Appareil Los Angeles

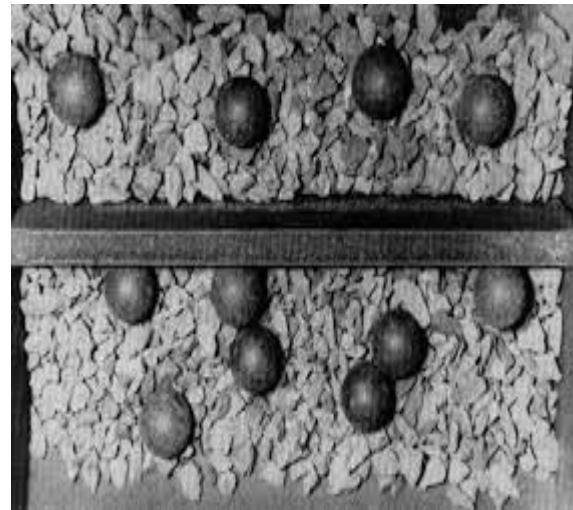
Figure IV.4: Boulets sphériques ($\phi = 47\text{mm}$) en acier

Tableau IV.3 Classes granulaire et la charge abrasive de l'essai LA

Classe granulaire (mm)	Masse de l'échantillon (g)	Masse de la charge (g)	Nombre de boulets
4 – 6.3	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}} : 5000\text{g}$	3080	7
6.3 - 10	Tamis $\frac{10\text{mm}}{6.3\text{mm}} : 5000\text{g}$	3960	9
10 - 14	Tamis $\frac{14\text{mm}}{10\text{mm}} : 5000\text{g}$	4840	11
10 - 25	Tamis $\frac{16}{10} : 3000\text{g}$ et $\frac{25}{16} : 2000\text{g}$	4840	11
16 – 31.5	Tamis $\frac{25}{16} : 2000\text{g}$ et $\frac{31.5}{25} : 3000\text{g}$	5280	12
25 – 50	Tamis $\frac{40}{25} : 2000\text{g}$ et $\frac{50}{40} : 3000\text{g}$	5280	12

Si **M** est la masse du matériau soumis à l'essai, **m** la masse des éléments inférieurs à 1.6mm produite au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime

par la quantité : $\frac{m}{M} \times 100$

Cette quantité sans dimension est appelée par définition, coefficient Los Angeles du matériau (**LA**).

➤ Expression des résultats

Le coefficient Los Angeles (**LA**) est, par définition, le rapport : $\frac{m}{5000} \times 100$

Où : $m = 5000 - m'$: est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6mm.

$$\text{LA} = [(5000 - m') / 5000] \times 100.$$

Le tableau IV.4 ci-dessous donne la classification des granulats en fonction de la valeur du coefficient Los Angeles selon la norme XP P 18-540:

Tableau IV.4 Classes des granulats selon de l'essai LA

Catégorie	Vss
LA _A	30
LA _B et LA _C	40
LA _D	50

IV.2.3 Résistance à l'usure de surface par abrasion : Essai de Dorry EN 1097- 8

➤ Définition

Cet essai a pour objectif principal d'évaluer la résistance des granulats à l'usure superficielle par abrasion, propriété essentielle pour les matériaux soumis à des sollicitations répétées, notamment dans les infrastructures routières. Il est réalisé à l'aide d'un dispositif expérimental connu sous le nom de machine de Dorry, utilisée historiquement pour ce type de caractérisation.

La machine est constituée d'une meule circulaire plane en fonte, de 60 cm de diamètre, animée d'une vitesse de rotation comprise entre 30 et 40 tours par minute. Un matériau abrasif est déversé de manière continue et contrôlée sur la surface de la meule à l'aide d'un entonnoir spécifique, assurant ainsi des conditions d'essai reproductibles.

Cet essai est principalement appliqué à l'évaluation des gros granulats, en particulier ceux destinés à la réalisation de mélanges bitumineux, pour lesquels une bonne résistance à l'abrasion conditionne la durabilité et les performances mécaniques des chaussées.



Figure IV.5: Machine d'abrasion pour essai de Dorry

➤ Principe de l'essai

Des éprouvettes cylindriques de diamètre 8 cm sont disposées sur un disque rotatif et maintenues en position par des porte-éprouvettes à coulissoir vertical, permettant l'application uniforme de la charge. Une pression normale de 250 g/cm^2 est appliquée sur chaque éprouvette.

Le disque est mis en rotation à une vitesse constante de 40 tours par minute pendant une durée de 50 minutes. Simultanément, les porte-éprouvettes effectuent une rotation autour de leur propre axe, assurant une usure homogène de la surface des éprouvettes.

L'agent abrasif utilisé est un sable de dunes à granulométrie normalisée, introduit de façon continue en amont des éprouvettes, à un débit de 150 g de sable sec pour 100 m de parcours et par éprouvette. Le sable usé est ensuite raclé de la piste immédiatement en aval des éprouvettes afin d'éviter toute recirculation.

➤ Expression des résultats

Le résultat de l'essai correspond à la différence moyenne de hauteur des éprouvettes, exprimée en millimètres, entre l'état initial et l'état après usure.

IV.3 Justification des essais à l'usure

Les granulats peuvent subir des phénomènes d'usure (abrasion, attrition, frottement) lors de leur fabrication et de leur mise en œuvre. Ces mécanismes génèrent des particules fines, modifient la granulométrie et certaines propriétés du matériau, ce qui impose de fixer des limites à la résistance à l'usure des granulats.

Ces phénomènes d'usure sont accentués en présence d'eau, laquelle réduit les forces de frottement entre les particules et augmente leur mobilité relative, ce qui justifie la réalisation de l'essai Micro-Deval en milieu humide.

Application 01 :

Lors du tamisage, la perte au tamis de 1,70 mm d'une prise d'essai de 5000 g d'un granulat calcaire est de 1000 g.

- Quel est le pourcentage de perte Los Angeles ?
- Ce granulat est-il conforme pour être utilisé dans la réalisation de la fondation d'une chaussée ? justifier la réponse.

Solution :

La perte est définie comme suit :

$$\text{perte} = \frac{\text{masse initiale} - \text{masse refusée au tamis } 1,70 \text{ mm}}{\text{masse initiale}}$$

Comme la perte au tamis de 1,70 mm est de 1000 g, donc la masse refusée sur ce même tamis est de 4000 g.

$$\Rightarrow \text{perte} = \frac{5000 - 4000}{5000} = 20\%$$

Le pourcentage de perte obtenu est de **20%**. Or, la norme BNQ 2560-114, Travaux de Génie civil – Granulats, fixe une valeur limite de 50% pour le pourcentage de perte dans le cas des granulats destinés aux chaussées, ce granulat satisfait donc aux exigences normatives et peut être utilisé pour la réalisation de la fondation d'une chaussée.

Application 02 :

- Déterminer le coefficient Los Angeles de chaque classe granulaire des échantillons donnés par le tableau de mesure ci-dessous.

Nature du matériaux	Classe granulaire	Poids (g)	
		Initial	Final > à 1.6mm
15/25	10 - 25	5000	3664
8/15	10 - 14	5000	3525
8/15	6.3 - 10	5000	3653
3/8	4 – 6.3	5000	3835

Solution :

Les résultats de calcul du coefficient LA sont illustrés par le tableau suivant :

Nature du matériaux	Classe granulaire	Poids (g)			Coefficient Los Angeles LA=
		Initial	Final > à 1.6mm	Inférieur à 1.6mm : m=5000-m'	
15/25	10 - 25	5000	3664	1336	27
8/15	10 - 14	5000	3525	1475	29
8/15	6.3 - 10	5000	3653	1347	27
3/8	4 – 6.3	5000	3835	1165	23

Application 03 :

Un essai MDE a été réalisé sur différents échantillons de granulats de la carrière de Timezrit-Bejaia (différents calibres) :

15/25, 8/15 et 3/8.

- Remplissez le tableau ;
- Ces granulats sont-ils aptes à être utilisés dans la fabrication d'un béton de ciment Portland ? Justifier la réponse.

Nature du matériau	Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)	Poids (g)			MDE
			Initial	Final m'	Inférieur à 1,6mm m	
15/25	10 – 14	5000	500	408	?	?
8/15	6.3 – 10	4000	500	420	?	?
3/8	4 – 6.3	2000	500	424	?	?

Solution :

La masse du tamisât au tamis 1,6 mm = masse initiale – masse du refus au même tamis

⇒ La masse du tamisât au tamis 1,6 mm = 500 – masse du refus au tamis 1,6 mm.

$$\mathbf{m = 500 - m'}$$

$$\text{Le coefficient Micro Deval en présence d'Eau (MDE)} = \frac{500 - m'}{500} \cdot 100$$

Nature du matériau	Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)	Poids (g)			MDE (%)
			Initial	Final m'	Inférieur à 1,6mm m	
15/25	10 – 14	5000	500	408	92	18
8/15	6.3 – 10	4000	500	420	80	16
3/8	4 – 6.3	2000	500	424	76	15

D'après la norme XP P 18-540 ; c'est à dire du point de vue dureté, ces gravillons sont classés en catégorie A, donc ils peuvent être utilisés comme composants d'un béton.

Chapitre V : Influence de la granulométrie sur les propriétés physiques d'un granulat

V.1 Introduction

La granulométrie exerce une influence déterminante sur les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats, et par conséquent sur les propriétés des bétons, telles que l'ouvrabilité, le module d'élasticité et la résistance mécanique. Une compréhension approfondie de l'effet de la granulométrie sur des paramètres tels que la compacité, la perméabilité, la capillarité, la forme des grains, la densité, le module de finesse et la teneur en particules fines est indispensable pour une optimisation des performances des matériaux.

Le choix des granulats joue donc un rôle majeur pour l'obtention de ces différentes propriétés.

V.2 Assemblage de sphères dans l'espace

Il est très rare que les particules de granulats présentent une forme parfaitement sphérique à l'état naturel. Néanmoins, les principes régissant les empilements de sphères peuvent être étendus à des assemblages de particules de formes plus irrégulières, tels que ceux rencontrés dans les granulats naturels. Les travaux des minéralogistes sur l'organisation spatiale des sphères ont montré qu'il est possible de considérer les matériaux solides comme des assemblages d'ions assimilables à des sphères, de dimensions identiques dans le cas des corps purs, ou variables dans le cas des minéraux composés.

V.2.1 Le cas de sphères uniformes

Le terme "sphères uniformes" désigne des sphères de diamètre identique. L'étude des assemblages des ions sphériques qui forment les minéraux a permis aux minéralogistes d'identifier un certain nombre de systèmes d'assemblage. Il existe deux (02) de ces systèmes d'assemblage dont la porosité est facile à calculer : l'assemblage cubique simple et l'assemblage cubiques à faces centrées.

➤ L'assemblage cubique simple

La figure V.1 ci-dessous illustre l'assemblage cubique simple. Dans ce système, le volume du cube équivaut à $(2r)^3 = 8r^3$, puisque $a = 2r$. Le volume des 8 huitièmes de sphère qui ont leur centre aux 8 sommets de la maille élémentaire est égal à $8 \times \frac{1}{8}$ de sphère, soit l'équivalent d'une sphère de rayon r , c'est-à-dire $\frac{4}{3} \pi r^3$. La porosité de l'assemblage s'exprime alors par la relation :

$$n = \frac{\text{volume du cube} - \text{volume solide}}{\text{volume du cube}} \times 100$$

$$n = \frac{8r^3 - \frac{4}{3}\pi r^3}{8r^3} \times 100$$

$$n = \frac{8 - \frac{4\pi}{3}}{8} \times 100$$

$$n = \left(1 - \frac{\pi}{6}\right) 100 = 48\%$$

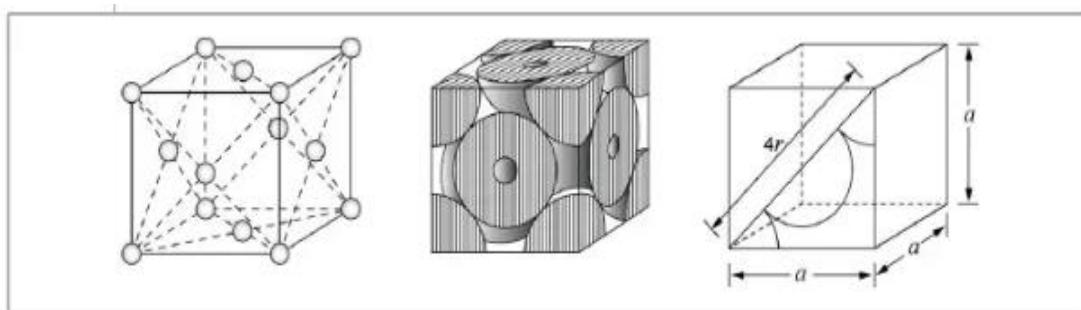


Figure V.1: Assemblage cubique simple

➤ L'assemblage cubique à faces centrées

Dans l'assemblage cubique à faces centrées, illustré à la figure V.2, le volume de la maille élémentaire est aussi a^3 . Cette maille contient six (06) demi-sphères, situées au centre de chacune des faces, ainsi que huit (08) huitièmes de sphère placés aux sommets.

Le nombre total de sphères équivalentes est donc : $6 \times \frac{1}{2} + 8 \times \frac{1}{8}$, ce qui correspond à quatre (04) sphères de rayon r .

Par conséquent, le volume occupé par les sphères à l'intérieur du cube de côté a est égal à :

$$4 \times \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{16}{3} \pi r^3.$$

La diagonale d'une face du cube est égale à $(a\sqrt{2})$, ou encore à $4r$. Le rapport $\frac{r}{a}$ est donc égal à $\frac{\sqrt{2}}{4}$

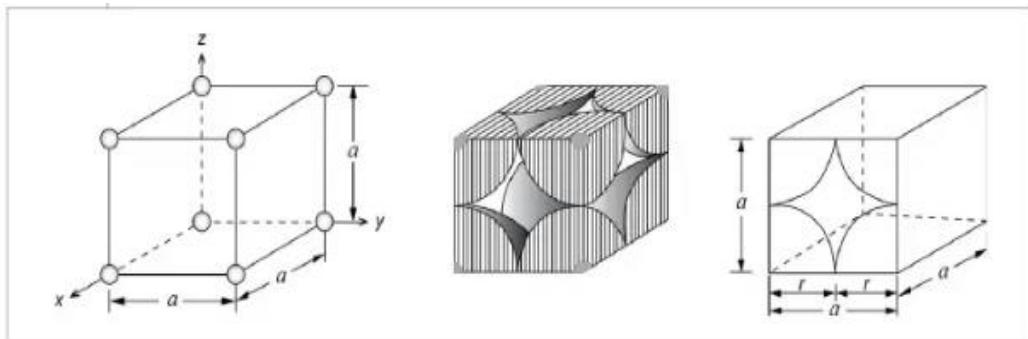


Figure V.2: Assemblage cubique à faces centrée

V.2.2 Le cas de sphères non uniformes

Dans un assemblage de sphères uniformes de grand diamètre, l'introduction de sphères plus petites (figure V.3) permet de réduire la porosité en occupant les vides interstitiels.

Il est alors possible de définir le rapport critique de passage, correspondant au diamètre maximal d'une sphère pouvant circuler librement dans l'assemblage sans le perturber, ainsi que le rapport critique d'occupation, qui représente le diamètre maximal d'une sphère pouvant être insérée dans les vides de l'assemblage.

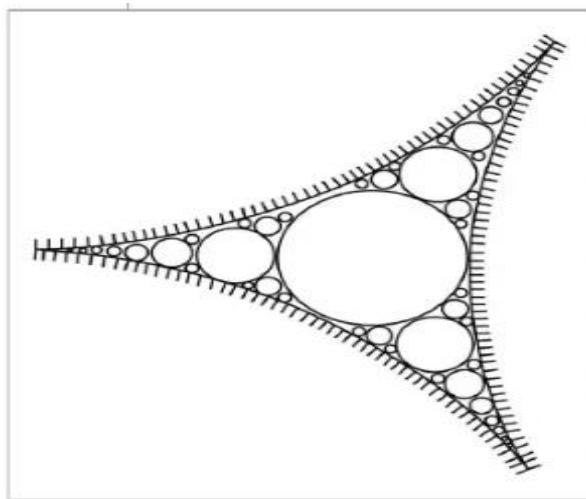


Figure V.3: Introduction de petites sphères dans l'espace libre entre trois grosses sphères

V.3 La loi de Darcy

Dans un matériau granulaire, la vitesse d'écoulement de l'eau V est proportionnelle au gradient hydraulique i , qui représente la perte de charge h par unité de longueur L . La loi de Darcy est : $V = k \cdot i$

K : le coefficient de perméabilité du granulat, exprimé en m/s ou cm/s.

En mécanique des sols, ce coefficient dépend à la fois des caractéristiques du milieu poreux et du fluide (l'eau). Plus un matériau granulaire est dense, moins il offre possibilité à l'eau de le traverser facilement.

V.4 La relation entre le coefficient de perméabilité k et la granulométrie

Etant donné que la surface spécifique d'un granulat est inversement proportionnelle au diamètre de ses particules (plus les particules sont petites, plus leur surface spécifique est grande), on peut dire, en première approximation, que la perméabilité d'un granulat est proportionnelle au carré de la dimension de ses particules. La formule empirique la plus utilisée pour relier la perméabilité d'un granulat et sa granulométrie est la formule de Hazen, qui est : $k = 100 (D_{10})^2$

\downarrow \downarrow
 (en cm/s) (en cm)

Par ailleurs, à granulométrie égale, un granulat composé de grains arrondis et polis présente une perméabilité plus élevée qu'un matériau constitué de particules angulaires, comme illustré sur la figure ci-dessous :

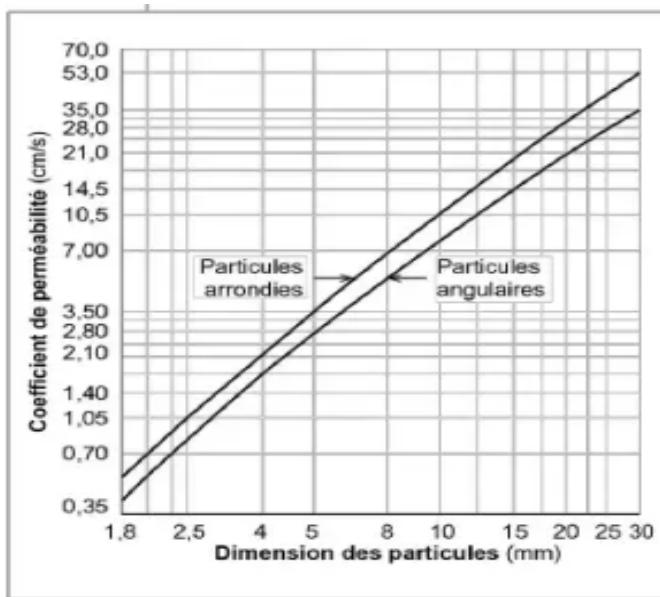


Figure V.4: Influence de la forme des particules des grains sur la perméabilité d'un matériau granulaire

V.5 La perméabilité de quelques mâtereaux granulaires

Le tableau V.1 suivant présente la perméabilité moyenne de quelques matériaux usuels. À titre d'ordre de grandeur, on rappelle que : que $10^6 \text{ cm/s} = 30 \text{ cm/année}$.

Tableau V.1 Perméabilité moyenne de certains matériaux granulaires

Nature du matériau granulaire	Coefficient de perméabilité k (cm/s)
Gravier	$10^{-1} < k < 10^2$
Sable	$10^{-3} < k < 10^{-1}$
Silt et sable argileux	$10^{-7} < k < 10^{-3}$
Till	$10^{-8} < k < 10^{-4}$
Argile	$10^{-11} < k < 10^{-7}$
Roches non fissurées	$10^{-13} < k < 10^{-8}$
Béton	$10^{-11} < k < 10^{-8}$

V.6 Critères d'utilisation des granulats

Les exigences applicables aux différents usages des granulats reposent sur l'expérience, les essais de laboratoire et de terrain, ainsi que sur les recherches fondamentales et appliquées et les retours d'expérience. En conséquence, le Cahier des Charges et Devis Généraux (CCDG) et les documents normatifs associés font l'objet de révisions continues.

V.7 Calibre d'un granulat

Le calibre d'un granulat correspond à son enveloppe granulométrique.

L'utilisation de classes granulaires permet aux producteurs de reconstituer les fuseaux de spécification à partir de matériaux de granulométrie maîtrisée, tout en optimisant la production par la limitation du nombre de classes élaborées.

Les principaux calibres de granulats sont présentés ci-dessous :

Familles	Dimension	Caractéristiques
Sables	0/D	0mm < D ≤ 4mm
Graves	0/D	D < 6.3mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2mm et D ≤ 63mm
Ballasts	d/D	d ≥ 31.5mm et D = 50 ou 63mm

Application 01 :

Calculer le rapport critique d'occupation dans un assemblage cubique simple, c'est-à-dire déterminer le diamètre maximal de la plus grande sphère pouvant être insérée dans l'espace interstitiel entre les sphères sans modifier l'assemblage.

Solution :

Si a est la longueur d'un côté du cube et $a/2$ est le rayon des sphères aux quatre coins du système, la diagonale d'un côté est de $\sqrt{a^2 + a^2} - \sqrt{2a}$.

Maintenant, on calcul la diagonale qui passe par deux sommets opposés du cube.

À cet effet, on prend un triangle de hauteur a et de longueur $\sqrt{2a}$.

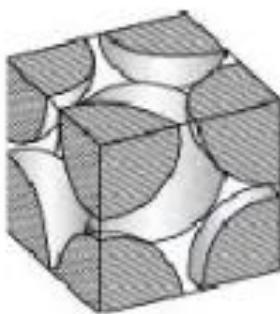
Donc, la diagonale du cube est égale à : $\sqrt{(\sqrt{2a})^2 + \sqrt{a^2}} = \sqrt{3a}$

Le diamètre maximal de la sphère pouvant être insérée au centre d'un assemblage cubique simple correspond à la diagonale considérée, diminuée du rayon des deux sphères opposées :

$$\sqrt{3a} - 2 \times \frac{a}{2} = (\sqrt{3} - 1) \times a$$

Application 02 :

Déterminer la porosité de l'assemblage cubique centré représenté par la figure ci-dessous, en supposant que toutes les sphères sont de même diamètre.



Solution :

Si on considère que : le rayon des sphères est r , et l'arrête du cube est a , la diagonale du cube a pour longueur $a\sqrt{3}$.

Or, cette diagonale s'exprime également par : $r + 2r + r = 4r$, d'où $\frac{r}{a} = \frac{\sqrt{3}}{4}$

Le nombre de sphères contenus dans le cube est égal à : $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$.

Donc, le volume solide est : $2 \times \frac{4}{3} \pi r^2$

La porosité de l'assemblage cubique centrée est :

$$\frac{\text{volume du cube} - \text{volume solide}}{\text{volume du cube}} \times 100 = \frac{a^3 - \pi r^3 \frac{8}{3}}{a^3} \times 100$$

En divisant numérateur et dénominateur par a^3 , on obtient : $n = \left(1 - \frac{\pi\sqrt{3}}{8}\right) 100 = 32\%$

Références

- 1.** *R.Dupain, J.C.Saint-Arroman ; "Granulat, Sols, Ciment et Bétons ", 2^{ème} Edition CASTEILLA, 2000.*
- 2.** *P.C. Aïtcin, F. Généreux, G. Jolicoeur et Y. Maurice ; "Technologie des granulats", 4^{ème} Edition Renée Theorêt, ISBN 978-2-89732-108-6. 2018.*
- 3.** *G. Arquie, K.C. Touren ; "Granulats", Edition Presse des Ponts et Chaussées, Paris, 1990.*
- 4.** *P. Habib ; " - Génie géotechnique - Applications de la mécanique des sols et des roches", Ellipses, 222 p. 1997.*
- 5.** *P.C. Aitcin, G. Jolicoeur, M. Mercier ; "Technologie des granulats", Edition Griffon d'argile, Quebec, 1983.*
- 6.** *A. Maldanado ; " Contrôle des granulats en carrières", BPLC N°60, 1972.*
- 7.** *K.H. Head; "Manuel of Soil Laboratory Testing", Vol. 1, 2 and 3, Second Edition, Pentech Press, 1992.*
- 8.** *F. Portet ; "Aide-mémoire ; Interprétation d'essais de pompage", ENTE Aix en Provence, Octobre 2003.*
- 9.** *J. Costet, G. Sanglerat ; "Cours pratique de mécanique des sols, Tome 1– Plasticité et calcul des tassements ", Dunod, Paris, 1981.*
- 10.** *J. Costet, G. Sanglerat ; "Cours pratique de mécanique des sols, Tome 2– Calcul des ouvrages ", Dunod, Paris, 1981.*
- 11.** *P. Habib ; " - Génie géotechnique - Applications de la mécanique des sols et des roches", Ellipses, 222 p. 1997.*